



PATENT

DOCKET NO. 3701-4000

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant(s) : Jes Broeng Examiner: TBA  
Stig Eigil Barkou  
Anders Overgaard Bjarklev Group Art Unit: 2874

Serial No. : 09/282,303

Filed : March 31, 1999

For : A Photonic Band Gap Fiber

CLAIM TO CONVENTION PRIORITY

RECEIVED  
JUN 25 1999  
TECHNOLOGY CENTER 2800

ASSISTANT COMMISSIONER FOR PATENTS  
WASHINGTON, D.C. 20231

S I R:

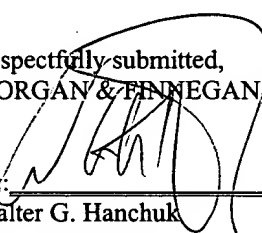
In the matter of the above-identified application and under the provisions of 35 U.S.C. §119 and 37 C.F.R. §1.55 applicant claims the benefit of the following prior application(s):

Application filed : Denmark  
In the name of : Jes Broeng, Stig Eigil Barkou and Anders Overgaard Bjarklev  
Application No. : PA 1998 00779  
Filing Date : June 9, 1998

1. ☒ Pursuant to the Claim to Priority, applicant submits herewith a duly certified copy of said foreign application(s).

2. ☐ A duly certified copy of said foreign application has been filed in the instant application on \_\_\_\_\_.

Respectfully submitted,  
MORGAN & FINNEGAN, L.L.P.

By:   
Walter G. Hanchuk  
Reg. No. 35,179

Date: June 14, 1999

Mailing Address:  
MORGAN & FINNEGAN, L.L.P.  
345 Park Avenue  
New York, New York 10154  
(212) 758-4800 Telephone  
(212) 751-6849 Facsimile



# Kongeriget Danmark

Patentansøgning nr.:

PA 1998 00779

Indleveringsdag:

9. juni 1998

Ansøger:

Jes Broeng,  
Nørgaardsvej 22 B, 1. tv.,  
2800 Lynby;  
Stig Eigil Barkou,  
Lyngbyvej 431 B, 1. tv.,  
2820 Gentofte;  
Anders Overgaard Bjarklev,  
Institut for Elektromagnetiske Sys-  
temer,  
Danmarks Tekniske Universitet, DTU,  
Bygning 348,  
2800 Lyngby

RECEIVED  
JUN 25 1999  
TECHNOLOGY CENTER 2800

Herved bekræftes følgende oplysninger:

Vedhæftede fotokopi er en sand kopi af følgende dokument:

- beskrivelse, sammendrag og tegning indleveret på ovennævnte indleveringsdag.



Erhvervsministeriet  
Patentdirektoratet



Taastrup 26. marts 1999

*Clara Jørgensen*  
Clara Jørgensen  
Kontorfuldmægtig

d. 9/6-1998

09 JUNI 1998

Ansøgere: Jes Broeng  
Nørgaardsvej 22B 1<sup>TV</sup>  
2800 Lyngby

Stig Eigil Barkou  
Lyngbyvej 431 B<sup>1TV</sup>  
2820 Gentofte

Anders Overgaard Bjarklev  
Institut for Elektromagnetiske Systemer  
Danmarks Tekniske Universitet  
DTU Bygning 348  
2800 Lyngby

**Fotonisk båndgabs fiber**

- Opfindelsen angår en optisk fiber, som leder elektromagnetiske felter (fortrinsvis i den optiske del af frekvensspektret), således at der herigennem kan transmitteres optisk effekt og/eller signaler gennem denne. Fiberen består af en kerne, der typisk er placeret i fiberens centrum, og omkring kernen en kappe, der består af en rumlig periodisk dielektrisk struktur. Den periodiske dielektriske struktur har til formål at forhindre effektudbredelse af det transmitterede optiske felt i retninger forskellige fra fiberens længdeakse, gennem dannelsen af et todimensionalt fotonisk båndgap, dvs. at dimensionerne af den periodiske dielektriske struktur skal være tilpasset således, at der dannes frekvens bånd gap definerende et eller flere bånd af frekvenser for den elektromagnetisk stråling, i hvilke(t) strålingen, der udbreder sig i retning af fiberens længdeakse og retninger i et vinkelinterval omkring denne, i det væsentlige er forhindret i at udbrede sig på tværs af fiberens frembringerakse. Den periodiske dielektriske struktur udmærker sig derved, at den består af huller og/eller stave placeret i et baggrundsmateriale på en sådan måde, at hullernes/stavenes center-akser står vinkelret på det tværplan, der er vinkelret på fiberaksen (hullernes/stavenes center-akser løber altså parallelt med fiberaksen), og disse center-akser er placeret i et todimensionalt hexagonalt Bravais gitter (denne struktur er for udbredelse i tværplanen beskrevet i D.Cassagne, C.Jouanin, D.Bertho, "Optical properties of two-dimensional photonic crystals with graphite structure", Appl.Phys.Lett, Vol.70, No.3, January 1997, pp.289-291). I forbindelse med udbredelse ud af planen (som tilfældet er for de her beskrevne optiske fibre) er denne struktur for identiske stave/huller ofte betegnet som en 2-dimensional grafit struktur, eller en bi-celle struktur.
- Den transversale ydre afgrænsning af fiberen kan enten realiseres ved at den periodiske dielektriske struktur fortsættes ud til fiberens afgrænsning, eller ved at den fotoniske båndgabsfiber omgives af et kun radiale varierende brydningsindeks.

- Optiske fibre og integrerede optiske bølgeledere har idag en særdeles udbredt anvendelse blandt andet indenfor områder såsom kommunikation, sensortechnologi, spektroskopi, og medicin. Disse fungerer normalt derved, at de leder det elektromagnetiske felt (lyset) gennem den fysiske effekt, der betegnes som total indre refleksion. Hermed undgås udbredelse (tab) af optisk effekt i retninger vinkelret på bølgelederens akse. Med henblik på opnåelse af den totale indre refleksion i disse bølgeledere, der ofte består af dielektriske materialer eller halvledere (sidstnævnte i tilfældet af integreret optik), er det nødvendigt at benytte et højere brydningsindeks af kernen i forhold til det omgivende medium. Total indre refleksion er således en fysisk egenskab, der har været kendt og udnyttet i teknologisk sammenhæng i årtier. I løbet af de seneste ti år har udviklingen indenfor nye materialer imidlertid åbnet mulighed for at kunne lokalisere og styre elektromagnetiske felter i kaviteter eller bølgeledere med en helt ny fysisk effekt, der ofte betegnes som den fotoniske båndgabs effekt. Denne fysiske effekt opnås ved etableringen af en rumlig periodisk gitterstruktur, i hvilken gitterdimensionerne og de indgående materialer er tilpasset således, at det elektromagnetiske felt i visse frekvensområder ikke vil kunne udbrede sig i bestemte retninger i materialet. Disse fotoniske båndgabs materialer har været beskrevet i én-, to-, og tre-dimensionale tilfælde i faglitteraturen samt i flere patenter (se f.eks. US-Patent no. 5386215, US-Patent no.

- 5335240, US-Patent no. 5440421, US-Patent no. 5600483, US-Patent no. 5172267, US-Patent no. 5559825). En speciel klasse af komponenter, der benytter sådanne periodiske dielektriske strukturer, er de optiske fibre (eller bølgeledere) i hvilke den periodiske variation forefindes i retninger vinkelret på fiberens længdeakse, hvorimod strukturen er invariant langs fiberens frembringerakse. Indenfor de seneste to år har især forskere fra University of Bath, UK, præsenteret resultater for en sådan fiberstruktur realiseret ved en siliciumdioxid kerne omgivet af tynde, parallelle og luftfyldte rør, der er anbragt i en triangulær struktur. Fremstillede optiske fibre af denne type har gennem det seneste år vist sig at føre til muliggørelsen af helt nye udbredelsesegenskaber sammenlignet med optiske fibre af standard type. Imidlertid er det bemærkelsesværdigt, at selv disse nye fibre, har en kerne, hvis brydningsindeks er højere end middelindekset af det omgivende medium, hvorfor den bølgeledende effekt også i dette tilfælde kan henføres under total indre refleksion.

- Dette bevirker naturligvis også, at for anvendelser indenfor f.eks. sensorområdet, hvor man kan være interesseret i at kunne lokalisere felter i og omkring områder med lave brydningsindeks (f.eks. i luft kanaler) kan de idag kendte fibertyper ikke benyttes direkte. For at løse dette problem er det en interessant mulighed at sigte mod en realisering af en fiber, der alternativt kunne fungere ved den fotoniske båndgabs effekt. Hvis man imidlertid forestiller sig, at benytte den offentliggjorte triangulære kappegitter struktur, vil de idag kendte teknologiske grænser ikke muliggøre en sådan fotonisk båndgabsstruktur. Vi har derfor vendt vores interesse mod alternative periodiske strukturer, og opfindelsen beskriver løsningen af det opridsede problem med begrænsede hul dimensioner, idet den hexagonale kappegitter struktur kan realisere komplette fotoniske båndgab for felter, hvis udbredelsesvektor har en væsentlig komponent langs fiberens længdeakse.

- Opfindelsen har til formål at tilvejebringe en ny klasse af optisk fibre eller bølgeledere, hvor den bølgeledende effekt er opnået gennem udnyttelse af en ny hexagonal periodisk struktur, og hvorigennem der også opnås mulighed for transversal lokalisering af det elektromagnetiske felt i og omkring en kerne, hvis brydningsindeks ikke nødvendigvis behøver at være højere end det omgivende materiales (altså med andre ord bølgeledning i optiske fibre ved en ikke tidligere demonstreret effekt - den fotoniske båndgabs effekt).

- Dette formål opnås med en optisk fiber/bølgelederstruktur med den i krav 1's kendetegnende del angivne art. Herved vil der kunne opnås optiske fibre med forbedrede optiske udbredelseskarakteristika, derved at de i forhold til standardfibre, der virker ved total indre refleksion, vil besidde bredere frekvensintervaller, hvori fibrene kan operere med kun en bunden bølgetype. Desuden vil de beskrevne fotoniske båndgabsfibre være i stand til at koncentrere det elektromagnetiske felt i og omkring lavindeksområder, og de vil udvise brede frekvensintervaller, hvor såvel makrobøjningstab som dispersionsegenskaber vil afvige betydeligt fra de tilsvarende egenskaber ved standard optiske fibre.

Opfindelsen beskriver en metode til opnåelse af bølgeledning ved hjælp af fuldstændige fotoniske båndgab i optiske fibre/bølgeledere opbygget af en kerne og en kappe, hvoraf sidstnævnte er opbygget af en transversal periodisk dielektrisk struktur. Hermed menes, at udbredelse af optisk effekt ved en bestemt frekvens, men for en vilkårlig polarisation af lys, kan lokaliseres transversalt omkring et område, der bryder periodiciteten, eksempelvis omkring et lav-index kerne område, mens samtidig udbredelse af optiske effekt med samme frekvens og udbredelseskonstant, som det i kernen lokaliserede optiske felt, vil være forbudt i kappestrukturen. Denne virkning er opnået gennem opbygning af den periodiske kapperegion i en todimensional hexagonal grafit struktur, hvormed man i modsætning til for eksempel placering af den periodiske dielektriske struktur i et triangulært mønster opnår den fuldstændige fotoniske båndgabseffekt. Opfindelsen kan derfor udnyttes til transversal lokalisering af elektromagnetiske felter (lys) i fiberens kerneområdet, hvor man i modsætning til kendte teknikker ikke nødvendigvis behøver, at opbygge kerneområdet som et område med højere brydningsindeks end det omgivende materiale af hensyn til opnåelse af total indre refleksion. Opfindelsen kan for eksempel benyttes til fremstilling af specielle bølgeledere velegnede til anvendelse i optiske fibersensorer, hvor vekselvirkning mellem elektromagnetisk felt og eksempelvis en væske, der befinder sig i fiberens kerne, er ønskværdig. Andre eksempler omfatter optiske fiberkomponenter til optiske kommunikationssystemer, hvor fibrenes specielle bølgeledningsegenskaber udnyttes til optisk signalbehandling, herunder dispersionskompensation.

Et af de afgørende problemer ved nuværende realiseringer af optiske fibre med periodiske dielektriske kapperegioner har været, at man har fremstillet disse ved omhyggelig stabling af enten sekskantede glasstave med centrerede huller eller direkte ved stabling af tynde glastrør. Disse glasstave har været stablet i en triangulær struktur, hvorefter man har trukket den fremkomne preform til fibre. Selvom disse fibre ifølge adskillige artikler i internationale tidsskrifter og ved konferencer har været dokumenteret at udvise helt specielle og nye optiske egenskaber, har et problem været, at man kun har kunnet danne en fiberkerne ved indlæggelse af en glasstav uden centralt hul. Hermed har de fremkomne fibre virket ved total intern refleksion, og det har ikke vist sig muligt at koncentrere den optiske effekt i transversal retning i områder med lavt brydningsindeks. Opfindelsen løser dette problem ved anvendelse af den todimensionale hexagonale Bravais gitter struktur i det periodiske kappe område, hvormed kerneområdet (der kan betragtes som et brud på periodiciteten) kan dannes ved indførelsen af endnu et hul i centret af grafit strukturen. Det afgørende er, at den todimensionale hexagonale Bravais gitter struktur for realistiske fremstillingsparametre kan udvise fuldstændige fotoniske båndgab, hvorimod dette ikke er tilfældet for hidtidige triangulære gitter strukturer. En oplagt fordel ved opfindelsen er, at fremstillingen af den hexagonale grafit struktur er principielt enkel, idet den kan opnås ved skiftevis stabling af stave og rør med ens yderdimensioner, hvorefter den fremkomne fiberpreform kan trækkes til fibre på sædvanlig vis for standard optiske fibre.

Den tekniske virkning af opfindelsen er den, at et lysbundet (et elektromagnetisk felt) der indkobles fra enden af en fotonisk båndgabsfiber som beskrevet ved krav 1, vil kunne opdeles i komposanter med forskellige udbredelsesretninger og amplituder. De af komposanterne, hvis udbredelsesretninger danner en tilstrækkelig lille vinkel med fiberens længdeakse, vil opleve et fotonisk båndgab i det omkring kernen beliggende periodiske kappeområde, hvilket betyder at disse komposanter ikke vil kunne undslippe kerneområdet, men må indstille sig i den feltløsning, der opfylder Maxwell's ligninger for strukturen. Effekten har derfor lighedspunkter med den totale indre refleksion, der normalt benyttes i optiske fibre, men adskiller sig derved, at kerneområdet ikke skal opfylde de samme krav i forhold til det omgivende medium, som tilfældet er ved total indre refleksion.

I krav 2 beskrives en realisation af den fotoniske båndgabsfiber i hvilken hjørneelementerne i det todimensionale hexagonale Bravais gitter, der udgør kappeområdet nærmest kernen, består af cirkulære stave/huller opbygget af koncentriske ringe, hver med konstante brydningsindekssværdier. Kernen opbygges ligeledes ved sådanne koncentriske ringe (omend med mulighed for andre dimensioner og sammensætninger), og den i dette krav beskrevne fiber kan af fremstillingsmæssige årsager være fordelagtig.

I krav 3 beskrives en realisation af den fotoniske båndgabsfiber i hvilken fiberen yderst afsluttes mod det omgivende medium ved et homogent kappeområde med konstant brydningsindeks. Dette ydre kappelags funktion er dels at styrke fiberens mekaniske egenskaber, samt at lette fabrikation og trækning af de optiske fibre.

I krav 4 beskrives den fremstillingsmæssigt relativt simple realisering af den fotoniske båndgabsfiber, i hvilken hjørneelementerne i kappestrukturens todimensionale grafit gitter udgøres af cirkulære homogene områder med brydningsindeks lavere end det omgivende materiales brydningsindeks.

I krav 5 beskrives en fotonisk båndgabsfiber i hvilken også kernen udgøres af et cirkulært hul med lavere brydningsindeks end det omgivende materiales. Dette kan også være fordelagtigt af hensyn til fremstillingsteknologiske hensyn.

I krav 6 beskrives det tilfælde, hvor de cirkulære kappe- og kerneelementer er realiseret ved luftfyldte huller (f.eks. i en ren kvartsglas struktur), hvormed fiberen kan opbygges udelukkende ved brug af et grundmateriale i luft. Det er yderligere specificeret, at radius af hulleme i kapperegionen er mindre end eller lig hullet i kerneregionen, hvilket specielt er aktuelt til anvendelse i f.eks. sensorer, hvor en høj grad af vekselvirkning mellem luft (i kernecellens centrale hul) og elektromagnetisk felt er ønskværdig.

I krav 7 beskrives en realisation af den fotoniske båndgabsfiber, hvor gitterstrukturen består af en række luftfyldte huller placeret på symmetrisk måde i ét baggrundsmateriale (f.eks. glas). Dette

har den fordel, at fiberen kan fremstilles af et enkelt materiale, og man vil f.eks. til sensoranvendelser kunne gennemstrømme kanalerne med en væske, der ønskes at vekselvirke med det elektromagnetiske felt. I modsætning til tilfældet beskrevet i krav 6, er det i dette tilfælde fastlagt, at kernecellens centrale hul har en mindre radius end hullerne i den omgivende

- 5 kappestruktur. Disse realiseringer af den fotoniske båndgabsfiber vil muliggøre en nøje styring af fordelingen af den relative udbredende effekt imellem høj- og lavindeks områder, og specielle bølgeledende egenskaber vil kunne realiseres.

I krav 8 beskrives et specifikt designinterval for realisering af fotoniske båndgabsfibre med luftfyldte kanaler. De angivne parametergrænser er bestemt ud fra detaljerede teoretiske og

- 10 numeriske analyser af disse fibre. Den nedre grænse for gitter dimensionerne i kapperegionen er fastsat ud fra beregninger på fotoniske båndgabs fibre, hvor ønsket har været at kunne operere ved bølgelængder ned til ca. 400 nm, og den øvre grænse er bestemt ud fra ønsket om bølgeledning op til bølgelængder på ca. 1700 nm. Grænserne for parameteren  $a$  sættes af de hulstørrelser, der nedadtil muliggør en fotonisk båndgabsstruktur og opadtil er fysisk realiserbare.

- 15 I krav 9 beskrives ligeledes et specifikt designinterval for parametervalg i fotoniske båndgabsfibre. I forhold til krav 6 er den relative dimension af kerne hhv. kappehuller ombyttet, idet man med de to tilfælde kan opnå forskellig modifikation af de bølgeledende egenskaber. Grænserne for gitterdimensionerne er i lighed med forklaringen tilhørende krav 8 sat af ønsket om fortrinsvis at kunne benytte de fotoniske båndgabsfibre i bølgelængdeintervallet fra 400 nm til  
20 1700 nm.

Opfindelsen skal i det følgende forklares nærmere under henvisning til tegningerne, hvor:

Figur 1 illustrerer den todimensionale hexagonale Bravais gitter struktur, som udgør det kappeområde, der omgiver fiberens/bølgelederens kerne.

- Figur 2 illustrerer en enhedscelle i den todimensionale hexagonale Bravais gitter kappestruktur,  
25 med angivelse af flere benyttede materialetyper samt mellemliggende (ikke symmetribrydende) huller.

Figur 3 illustrerer fiberens/bølgelederens kerneområde og nærmeste kappeomgivelser.

Figur 4 viser et eksempel på en beregning af de fuldstændige båndgab, der forekommer for den periodiske todimensionale hexagonale Bravais gitter kappestruktur.

- 30 Figur 5 viser et eksempel på et beregnet bånddiagram for den periodiske todimensionale hexagonale Bravais gitter kappestruktur.

Figur 6 viser den normaliserede frekvens,  $k\Lambda$ , (hvor  $k$  er fritrums udbredelseskonstanten for det elektromagnetiske felt) som funktion af den relative størrelse af det i kernecellen centrale huls



tværsnitsareal i forhold til kappehullernes tværsnitsareal, med angivelse af den egenløsning, der svarer til den omkring fiberkernen bundne bølgetype i en fiber med lavt kernebrydningsindeks og en kappe bestående af det todimensionale hexagonale Bravais gitter.

- Figur 7 viser et eksempel på beregnede elektromagnetiske intensitetsfordelinger af felter, for den bundne bølgetype i en fiber med lavt kernebrydningsindeks og en kappe bestående af et todimensionalt hexagonalt Bravais gitter.

- Figur 1 illustrerer et typisk tværsnit af den i fiberens længdeakse invariante periodiske kappestruktur opbygget som et todimensionalt hexagonalt Bravais gitter. Dette gitter er dannet af en ligesidet hexagonal (1), hvis hjørnepunkter alle er placeret i en fælles afstand  $\Lambda$  fra hexagonalens centrum. I hvert hjørnepunkt for det todimensionale hexagonale Bravais gitter er en stav/hul (2) med et brydningsindeks, der afviger fra det omgivende materiales brydningsindeks, placeret. I Figur 1 er de illustrerede stave af et cirkulært tværsnit, med radius  $a$ , men stavenes tværsnit kunne ligeledes tænkes at have andre former end det cirkulære, blot disse ikke bryder cellens symmetri. Det vil med andre ord sige, at kappestrukturen stadigvæk kan dannes ved transvers forskydning og gentagelse af den irreducible enhedscelle (3), der ligeledes er vist på Figur 1. En anden mulighed for modifikation af kappecellestrukturen, uden at den fundamentale symmetri brydes er eksemplificeret ved Figur 2, hvor de stave/huller, der er placeret centreret i hexagonalens hjørner, er vist opbygget af en indre cirkulær del (4) og en ydre ringformet del (5) bestående af forskellige materialer. Figur 2 viser også inkludering af mellemliggende huller (6), der ved placering i en fælles afstand på  $\Lambda / \sqrt{3}$  fra enhedscellens hjørner og stavenes/hullernes (4) centre hermed ikke bryder symmetrien. Disse mellemliggende huller har i Figur 2 en radius  $b$ . Endeligt er der i Figur 2 i enhedscellens hjørner indføjet cirkulære områder (7) med radius  $c$ , hvis brydningsindeks er afvigende fra baggrundsmaterialets (8) brydningsindeks. Det bemærkes, at de mellemliggende stave/huller (6) for eksempel kan fremkomme som følge af en fabrikationsproces, hvori preformen opbygges af sammenstablede rør og stave. Disse mellemliggende huller (6) kan ligeledes indføres af hensyn til design af fiberegenskaberne. Figur 3 illustrerer et tværsnit af kernen og dennes nærmeste omgivelser i den fotoniske båndgabsfiber (9), bestående af en centralt placeret kernecelle (11), en periodisk (todimensional hexagonal Bravais gitter) kappe region (10), hvor antallet af perioder kan afvige betydeligt fra det i Figur 3 viste. Figur 3 illustrerer desuden, at kernecellen (11) afviger fra de tilstødende kappeceller, derved at man i det her valgte eksempel har indføjet en i kernecellen centralt placeret stav/hul (12), hvormed man ved dette brud på symmetrien (kappecellerne kan ikke dannes ved translation og gentagelse af kernecellen) opnår mulighed for lokalisering af det elektromagnetiske felt. Udenfor det i Figur 3 viste område (kerne og todimensionalt hexagonalt Bravais gitter kappe) kan den fotoniske båndgabsfiber opbygges af enten et homogent ydre område eller af en sammensætning af materialer. Denne yderste kapperegion har væsentligst mekaniske og fabrikationsmæssige årsager, idet det elektromagnetiske felts intensitet vil være aftaget til ubetydelige niveauer i dette område. Kernen, der i det konkrete eksempel tænkes opbygget af flere koncentriske områder (hvert med

brydningsindeks, der vil afvige fra brydningsindeks af det omgivende medium) er specificeret ved en yderradius  $d$ . Imidlertid kan man også forestille sig at realisere kerneområdet på anden vis, f.eks. gennem brug af flere rumligt adskilte dele, med brydningsindeks forskellige fra baggrundsmaterialets.

- 5 Figur 4 illustrerer et eksempel på de fuldstændige båndgab (den normaliserede frekvens  $2\pi \frac{\Lambda}{\lambda}$ , hvor  $\lambda$  angiver bølgelængden, som funktion af den normaliserede udbredelseskonstant langs fiberaksen), der opnås via en periodisk strukturering af kappeområdet. Eksemplet i figur 4 er for den periodiske todimensionale hexagonale Bravais gitter kappestruktur, hvor baggrundsmaterialet (8) har konstant brydningsindeks med en værdi på 1,45. Elementerne i den hexagonale
- 10 kappestruktur (1), hvis periode  $\Lambda = 2,05 \mu\text{m}$ , er cirkulære luftfyldte huller (2) med dimensioner givet ved en radius værdi på  $a = 0,72 \mu\text{m}$ . De mellemliggende huller (6) er i dette tilfælde antaget forsvindende små. Figur 4 viser placeringen af forbudte områder (fuldstændige båndgab) i hvilke feltudbredelse ikke kan forekomme i kappen. Et elektromagnetisk felt med en kombination af normaliseret frekvens og normaliseret udbredelseskonstant, der falder indenfor et fuldstændigt
- 15 båndgab, vil ikke kunne udbrede sig i kappeområdet, men derimod kunne bindes som en lokaliseret bølgetype til et geometrisk område, der bryder periodiciteten af kappestrukturen, eksempelvis et centralt placeret luftfyldt hul (12) i kerneregionen (for alle typer fibre, der leder optisk effekt ved hjælp af total indre refleksion, vil bølgetyper kun kunne bindes til en kerne med et højere brydningsindeks end det gennemsnitlige brydningsindeks af kappestrukturen og
- 20 samtidig kun for kombinationer af normaliseret frekvens og normaliseret udbredelseskonstant, der ligger under linien betegnet den kritiske vinkel).

- Figur 5 illustrerer et udvalgt bånddiagram (den normaliserede frekvens  $2\pi \frac{\Lambda}{\lambda}$ , hvor  $\lambda$  angiver bølgelængden, som funktion af den komponent af bølgetalsvektoren, der er beliggende i fiberens tværplan) for en fast normaliseret udbredelseskonstant lig  $2\pi$ . Beregningseksemplet er for den periodiske todimensionale hexagonale Bravais gitter kappestruktur, hvor baggrundsmaterialet (8)
- 25 har konstant brydningsindeks med en værdi på 1,45. Elementerne i den hexagonale kappestruktur (1), hvis periode  $\Lambda = 2,05 \mu\text{m}$ , er cirkulære luftfyldte huller (2) med dimensioner givet ved en radius værdi på  $a = 0,72 \mu\text{m}$ . De mellemliggende huller (6) er i dette tilfælde antaget forsvindende små. Figur 5 viser, hvorledes den todimensionale hexagonale Bravais gitter struktur for det specifikke valg af data, definerer et fotonisk båndgab, altså et normaliseret frekvensområde, hvor
- 30 udbredelse gennem kappen ikke kan finde sted.

Figur 6 viser den normaliserede frekvens ( $2\pi \frac{\Lambda}{\lambda}$ , hvor  $\lambda$  angiver bølgelængden) for en udvalgt normaliseret udbredelseskonstant lig  $2\pi$  som funktion af det relative areal  $A_{\text{kerne-defekt}}/A_{\text{kappe-hul}}$ , hvor  $A_{\text{kerne-defekt}}$  er tværsnitsarealet af det i kernecellen (11) centralt placerede luftfyldte hul (12), og  $A_{\text{kappe-hul}}$  er tværsnitsarealet af et for kappestrukturen definerede hul (2). Figur 6 viser den

separerede egenværdiløsning for den til kernen bundne bølgetype, samt de omgivende bånd, svarende til øvre og nedre afgrænsninger af det fotoniske båndgab. I det pågældende eksempel er den relative radius af hullerne i kappestrukturen givet ved forholdet  $a/\Lambda=0,352$ . Den periodiske kapperegion består af et minimum af 4 perioder.

- 5 Intensitetsfordelingen i et afgrænset tværsnit af fiberen for den til kernen bundne bølgetype er i Figur 7a illustreret for en bølgelængde på  $1,55 \mu\text{m}$  og en udbredelseskostant langs fiberaksen,  $\beta$ , på  $3,08\mu\text{m}^{-1}$ . I Figur 7b er placering af hullerne i fiberen illustreret for samme tværsnit som i Figur 7a. Det optiske felt er lokaliseret omkring kerneområdet ved den fotoniske båndgabs effekt, da den normaliserede frekvens og normaliserede udbredelseskostant ( $4,75$  og  $2\pi$  hhv.) falder
- 10 indenfor et fuldstændigt båndgab (se Figur 4).

## FOTONISK BÅNDGABS FIBER

69 JUNI 1998

SAMMENDRAG

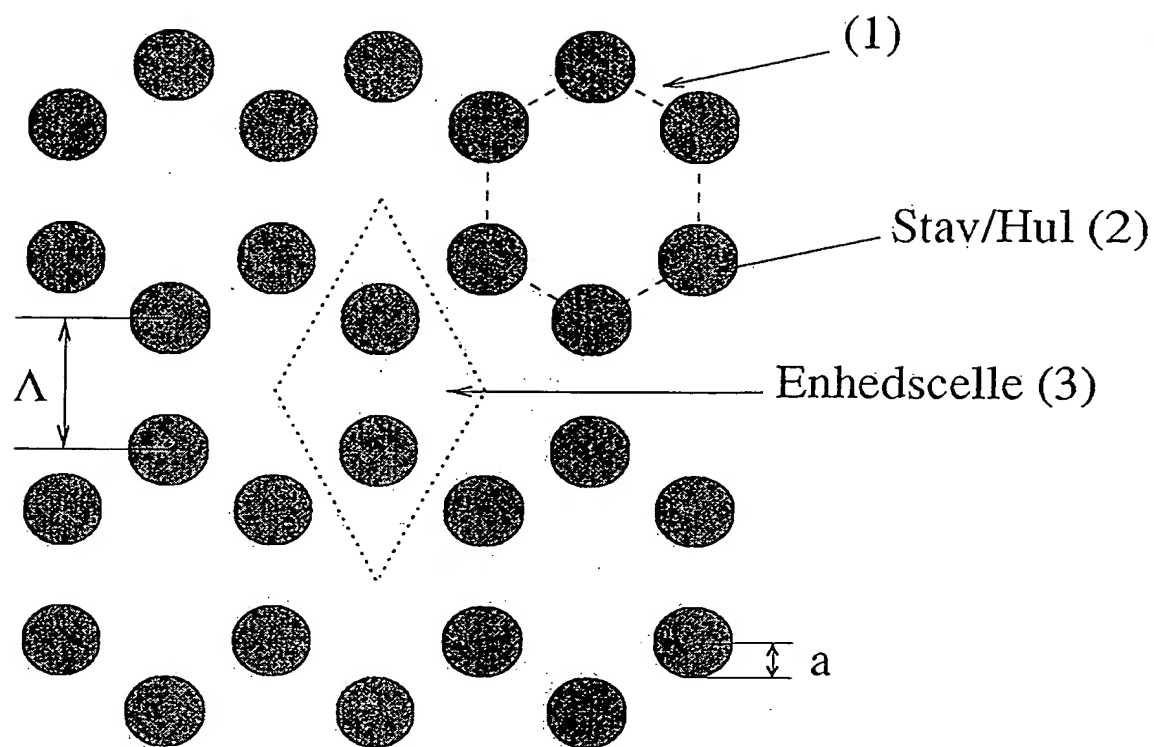
- En fotonisk båndgabs fiber bestående af en kerne (typisk placeret i fiberens centrum) og omkring denne en kappe, der består af en rumlig periodisk struktur. Den rumlige periodiske struktur, der
- 5 skal forhindre effektudbredelse af det gennem fiberen transmitterede elektromagnetiske felt i retninger forskellige fra fiberens længdeakse gennem dannelse af et todimensionalt fotonisk båndgab, består af huller og/eller stave placeret i et baggrundsmateriale, således at
- hullernes/stavenes centre er placeret i tværplanen vinkelret på fiberaksen i et todimensionalt hexagonalt Bravais gitter (en bi-celle struktur). Kernen kan typisk realiseres ved et hul eller en
- 10 stav placeret i fiberens centrum, og fiberen udmærker sig derved at der opnås bølgeledning af det elektromagnetiske felt ved den fotoniske båndgabs effekt i modsætning til bølgeledning ved total indre refleksion, som normalt benyttes for dielektriske bølgeledere.

PATENTKRAV

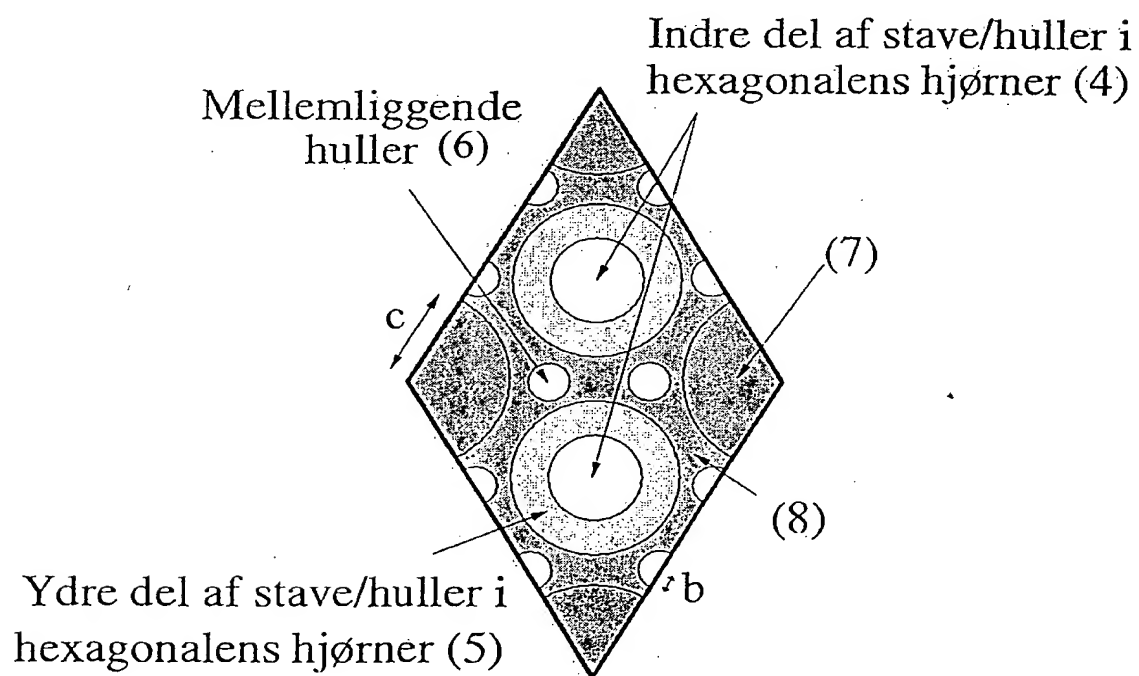
1. En optisk fiber/bølgeleder med en kerne, som er omgivet af en i forhold til fiberens længdeakse transversal rumlig periodisk struktur i hvilken dimensionerne er valgt således, at der opnås et frekvens båndgab for det elektromagnetiske felt, således at transversal udstråling ved de i båndet beliggende frekvenser er forhindret for felter, der udbreder sig langs fiberens længdeakse, og således at det elektromagnetiske felt har hovedparten af sin effekt centreret i og omkring fiberens kerneområde, kendetegnet ved at den periodiske struktur er opbygget af huller eller stave af materialer, hvis brydningsindeks afviger fra baggrundsmaterialets brydningsindeks, og disse huller eller staves centre er placeret i et todimensionalt hexagonalt Bravais gitter (bi-celle struktur), og således at den periodiske struktur kan indeholde yderligere stave eller huller, blot disse ikke bevirker at symmetrien i den hexagonale gitterstruktur brydes, og at kernen fremkommer ved, at symmetrien i den hexagonale gitterstruktur brydes i den centrale del af fiberen.
2. En optisk fiber ifølge krav 1, kendetegnet ved at såvel kerne som huller eller stave i det todimensionale hexagonale Bravais gitter er sammensat af en eller flere koncentriske ringe med forskellige brydningsindekssværdier.
3. En optisk fiber ifølge krav 1 kendetegnet ved, at den periodiske struktur bestående af det todimensionelle hexagonale Bravais gitter mod fiberens overflade omgives af et homogent materiale.
4. En optisk fiber ifølge krav 1 kendetegnet ved, at materialet i hjørnerne af det todimensionale hexagonale Bravais gitter udgøres af huller med cirkulære tværsnit udfyldt med et materiale, hvis brydningsindeks er lavere end det omgivende materiales brydningsindeks.
5. En optisk fiber ifølge krav 4 kendetegnet ved, at kernen udgøres af et hul med cirkulært tværsnit, og udfyldt med et materiale, hvis brydningsindeks er lavere end det omgivende materiales brydningsindeks.
6. En optisk fiber ifølge krav 4-5 kendetegnet ved, at hullerne i hjørnerne af det todimensionale hexagonale Bravais gitter er luftfyldte og har en radius  $a$ , samt at kernen ligelædes er luftfyldt og har en radius  $d$ , og disse radier forholder sig til hinanden som  $a \leq d$ .
7. En optisk fiber ifølge krav 4-5 kendetegnet ved, at hullerne i hjørnerne af det todimensionale hexagonale Bravais gitter er luftfyldte og har en radius  $a$ , samt at kernen ligeledes er luftfyldt og har en radius  $d$ , og disse radier forholder sig til hinanden som  $a > d$ .
8. En optisk fiber ifølge krav 6 kendetegnet ved, at radius  $a$  af hullerne i det todimensionale hexagonale Bravais gitter er givet ved gitter dimensionen  $\Lambda$ , hvor  $100 \text{ nm} < \Lambda < 8500 \text{ nm}$ , og ved relationen  $0,1\Lambda < a < 0,45\Lambda$ .

9. En optisk fiber ifølge krav 7 kendetegnet ved, at radius  $a$  af hulle i det todimensionale hexagonale Bravais gitter er givet ved gitter dimensionen  $\Lambda$ , hvor  $100 \text{ nm} < \Lambda < 8500 \text{ nm}$ , og ved relationen  $0,1\Lambda < a < 0,45\Lambda$ .

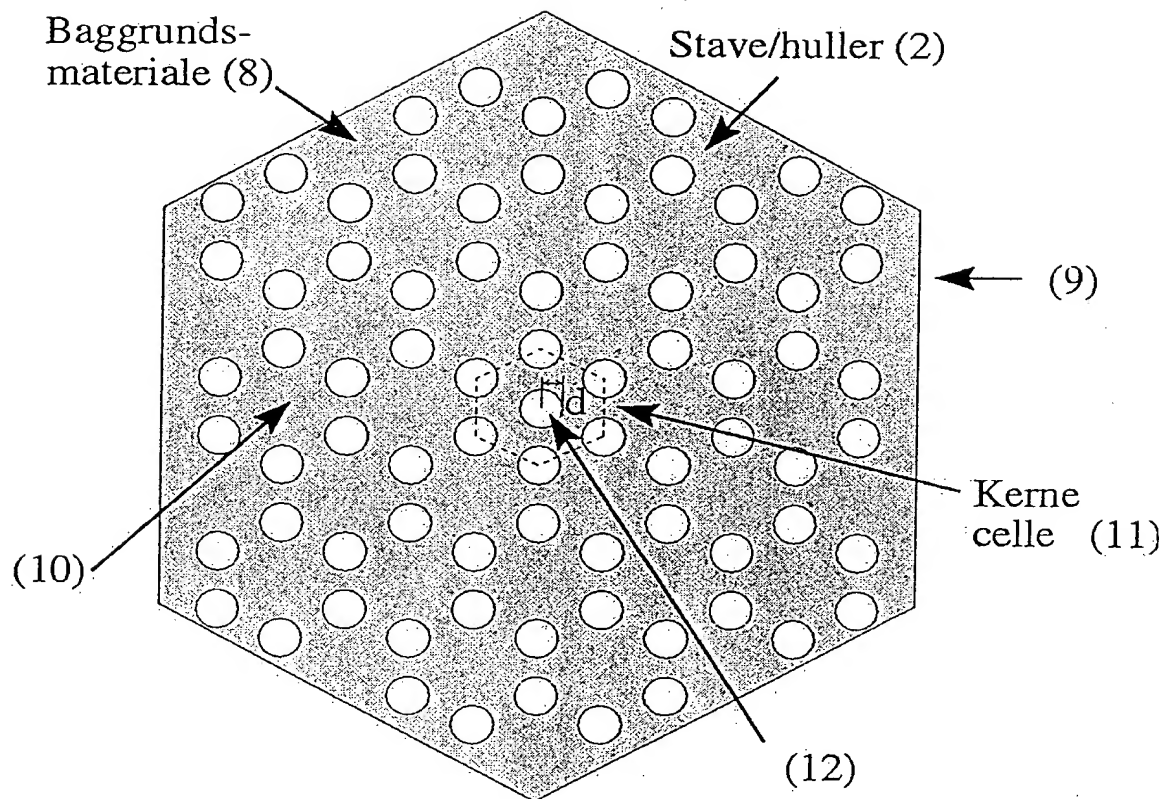
Figur 1



Figur 2



Handwritten signature.

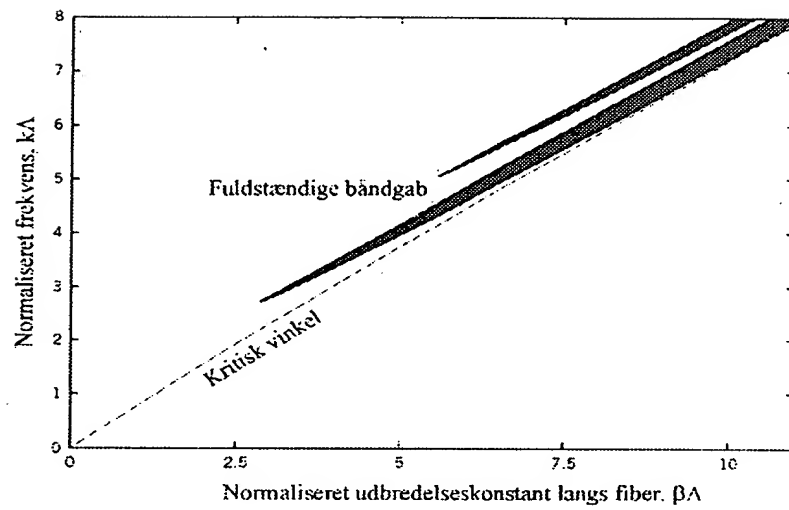


Figur 3

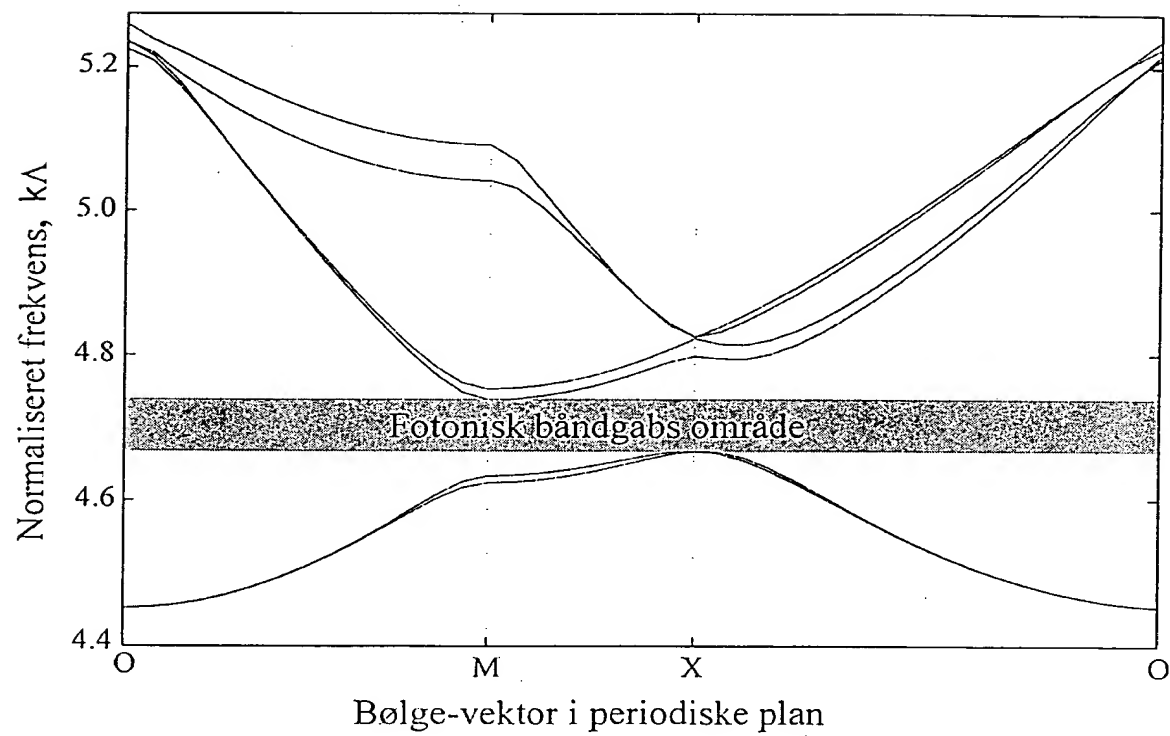
8



Figur 4



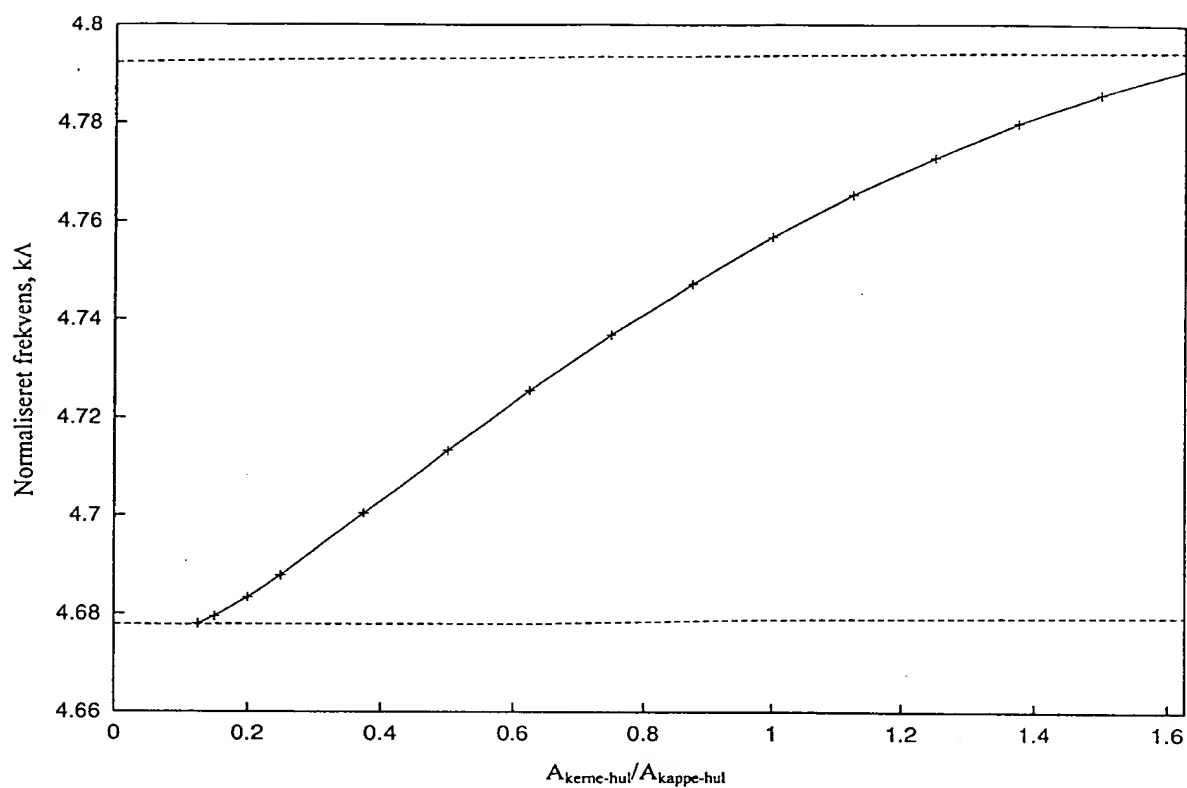
cf



Figur 5

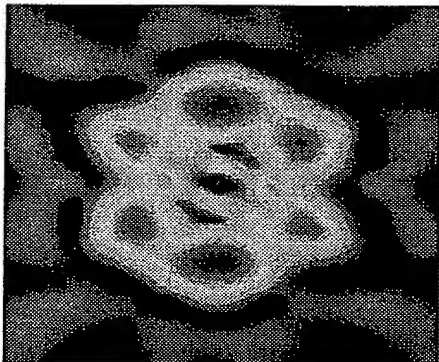
cf

Figur 6

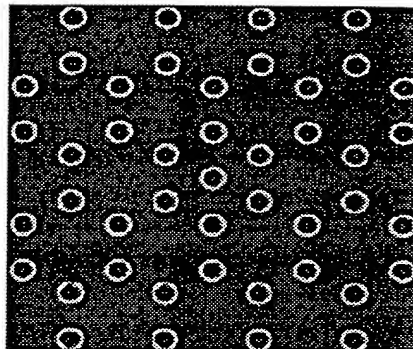


cf

**Figur 7a**



**Figur 7b**



*[Handwritten signature]*